计算机科学与技术专业必修课

计算机组成

机器语言(3)

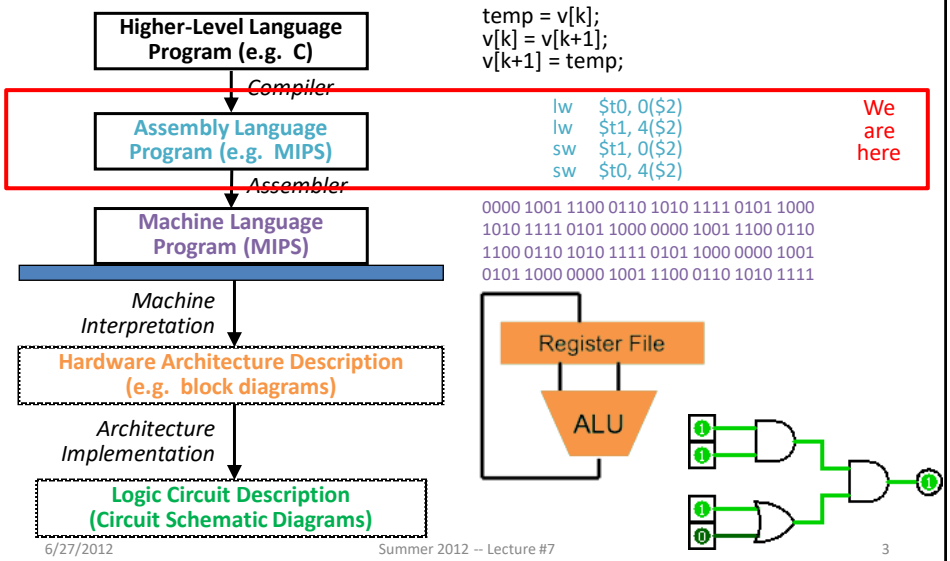
高小鹏

北京航空航天大学计算机学院

提纲

- 存储型程序概念
- R-指令格式
- I-指令格式
  - 分支和PC相关寻址
- J-指令格式

Great Idea #1: Levels of Representation/Interpretation



提纲

- 存储型程序概念
- R-指令格式
- I-指令格式
  - 分支和PC相关寻址
- J-指令格式

程序存储概念

- 指令以二进制方式被编码
- 程序存储在存储器中；可以从存储器中读取程序也可以写入程序
  - 存储方式与数据存储完全相同
- 简化了计算机系统的软件/硬件设计
- 存储器技术既可以存储数据，也可以存储程序
- 由于存储在存储器单元中，因此指令和数据都有地址

二进制兼容

- 程序是以二进制形式发布的
  - 指令集与程序之间是强相关
- 新机器不仅能运行基于新指令编译产生的新程序，同样也最好能运行老程序
- 上述特性被称为向后兼容（backward compatible）
  - 示例：今天的i7处理器仍然能运行1981年在8086处理器上编译产生的程序

北京航空航天大学计算机学院
School of Computer Science and Engineering, Beihang University

把指令当做数看待1/2

- 假设：所有的数据都是以字为单位的(32位)
  - 每个寄存器是字宽度的
  - lw和sw读写主存的单位是字
- 问题：如何用二进制表示指令？
  - 计算机只能理解0和1，无法理解“add $t0,$0,$0”
- 回答：数据以字为单位，每条指令同样被编码为一个字！
  - MIPS的所有指令的二进制编码宽度均为32位

把指令当做数看待2/2

- 指令的32位被划分为若干域
  - 域：占据若干特定位；代表特定含义
  - 同一个域在不同指令的含义大体是相同的
- 指令的32位解读与数据的32位数是不同的
  - 数据的32位是作为一个整体被解读
  - 指令的各个域分别表示指令的不同信息

T
设计越规则
实现越简单

field~域

MIPS的3类指令格式

- I型指令：指令中包含立即数
  - lw/sw的偏移是立即数；beq/bne同样包含有偏移
  - srl等移位指令：也有5位立即数（移位位数），但不属于I型指令
- J型指令：j和jal
  - jr：不是J型指令
- R型指令：所有其他的指令

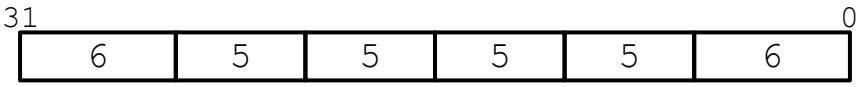
srl 与 **jr** 都是 **R** 型指令!

提纲

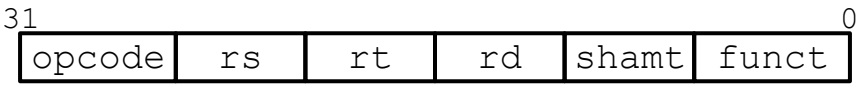
- 存储型程序概念
- R-指令格式
- I-指令格式
- 分支和PC相关寻址
- J-指令格式

R型指令1/3

- 指令包含6个域：6 + 5 + 5 + 5 + 5 + 6 = 32



- 为便于理解，每个域都有一个名字



- 每个域都被视为无符号整数
  - 5位域表示范围为：0~31
  - 6位域表示范围为：0~63

R型指令2/3

- opcode(6)：代表指令操作
  - R型指令的opcode固定为0b000000
- funct(6)：与opcode组合，精确定义指令的具体操作
  - 主要是服务于R型指令
- Q：MIPS最多可以有多少条R型指令？
  - 由于opcode固定为0，因此funct的编码数决定了最大条数：64
- Q：为什么不将opcode和funct合并未一个12位的域呢？
  - 后续内容将回答这个问题

R型指令3/3

- rs (5)：指定1st操作数（source寄存器）
- rt (5)：指定2nd操作数（target寄存器）
- rd (5)：指定结果回写的寄存器（destination寄存器）
- MIPS的寄存器个数是32，因此5位无符号数就可以表示
  - 这种编码方式非常直观：`add dst,src1,src2` → `add rd,rs,rt`
  - 注意：与具体指令相关，有的域是无效的
- shamt (5)：移位指令中的移位位数
  - 由于寄存器只有32位，因此移位位数大于31没有意义
    - 移位位数大于31，结果必然为0。既然如此，直接赋值为0而无需移位
  - 注意：除了移位指令，该域固定为0

指令类型及各域详细描述请阅读指令手册

R型指令示例1/2

- MIPS指令

```
add   $8,$9,$10
```

- 伪代码

```
add   R[rd] = R[rs] + R[rt]
```

- 构造各域

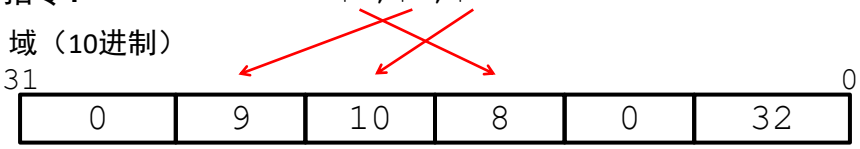
opcode = 0	(查手册)
funct = 32	(查手册)
rd = 8	(目的寄存器)
rs = 9	(1st寄存器)
rt = 10	(2nd寄存器)
shamt = 0	(不是移位指令)

指令类型及各域详细描述请阅读指令手册

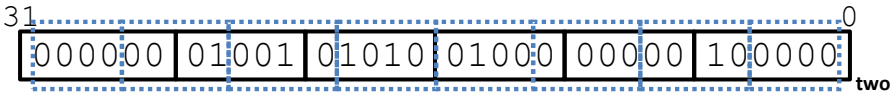
R型指令示例2/2

- 指令：　　add $8,$9,$10

域（10进制）



域（2进制）



16进制：0x 012A 4020

10进制：19,546,144

通常不这么表示指令

二进制编码：机器码

NOP

- 0x00000000是什么指令？
  - opcode：0，所以这是一条R型指令
- 根据指令手册，机器码对应的指令是

  sll $0,$0,0
  - Q：指令是什么功能？
- NOP是一条特殊指令
  - NOP主要用于解决流水线冲突

NOP：No Operation Performed

提纲

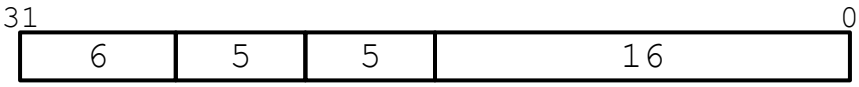
- 存储型程序概念
- R-指令格式
- I-指令格式
  - 分支和PC相关寻址
- J-指令格式

I型指令1/4

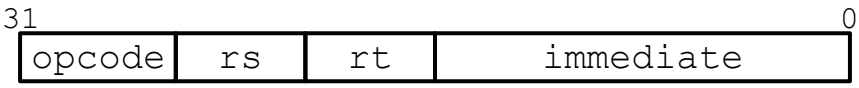
- 指令的立即数指的是什么？
  - 5位或6位的数字，太短，不被认为是立即数
- 理想的，MIPS最好只有一种指令格式
  - 很遗憾，我们必须在指令格式上进行折中
- 但是，在定义新的指令时，应该尽可能使得新指令格式与R型指令格式尽可能保持一致
  - 不难想象，如果使用了立即数，那么指令能用的寄存器最多只有2个

I型指令2/4

- 指令包含6个域：6 + 5 + 5 + 16 = 32



- 域的命名



- 前3个域与R型指令相同
  - 最重要的是opcode域保持在相同的位置

I型指令3/4

- opcode(6)：代表指令操作
  - I型指令的opcode为非零编码：总共可以编码64（2^6）条指令
  - R型指令用opcode和funct两个独立域有助于保持格式的兼容性
- rs (5)：指定1st操作数（source寄存器）
- rt (5)：指定2nd操作数（target寄存器）
  - target并非都是“目的”。例如：sw的rt就是“读”
- immediate (16)：无符号or有符号
  - 无符号：位运算指令（如and/or/nor等）、小于置位指令（如slti等）
    - zero_ext()：运算前需要进行无符号扩展
  - 有符号：分支指令（如beq/bne等）、访存指令（如lw/sw等）
    - 以word为单位
    - sign_ext()：运算前需要进行符号扩展

Q
对于lw/sw，16位立即数是否够用？

I型指令示例1/2

- MIPS指令

```
addi  $21,$22,-50
```

- 伪代码

```
addi  R[rt] = R[rs] + sign_ext(immediate)
```

- 构造各域

opcode = 8	(查手册)
rs = 22	(1st寄存器)
rt = 21	(2nd寄存器)
immediate = -50	(10进制或16进制表示均可)

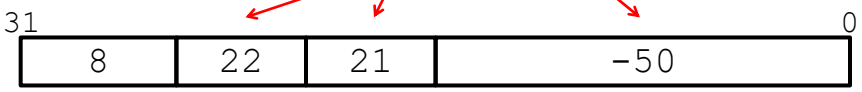
T
addi $rt, $rs, immediate

I型指令示例2/2

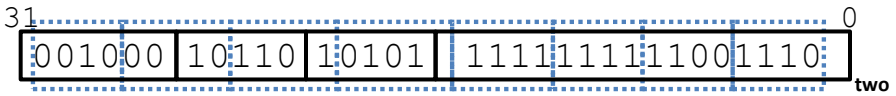
- 指令：

```
addi  $21,$22,-50
```

域（10进制）



域（2进制）



16进制：0x22D5FFCE

T
addi $rt, $rs, immediate

如何计算32位立即数？

- 32位立即数的应用场景，如：
  - addi/slti/andi/ori：等需要计算2个32位数
  - lw/sw：在使用前，需要先设置基地址寄存器的值（32位）
- 解决方案：不改变指令格式，而是增加一条新指令
- Load Upper Immediate (lui)
  - lui reg,imm
  - reg的高16位写入imm，低16位写入0
    - RTL：R[reg] ← imm || 0^{16}

lui示例

- 需求：addi $t0,$t0,0xABABCDCD
  - 这是一条伪指令！
- 会被assembler转换为3条指令

```
lui $at,0xABAB      # 高16位
ori $at,$at,0xCDCD  # 低16位
add $t0,$t0,$at     # 赋值
```

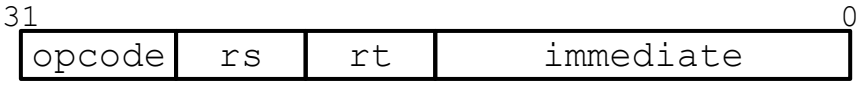
T
手工编写汇编时，尽量不适$at；只应由assembler使用$at

- 通过增加lui，MIPS可以用16位立即数来处理任意大小的数据

北京航空航天大学计算机学院 School of Computer Science and Engineering, Beihang University

分支指令（B类指令）

- **beq和bne**



  - 比较rs和rt，并根据比较结果决定是否转移
  - 并非所有的B类指令的rt域都是寄存器！
  - 需要指定要转移的地址
- 分支指令主要用于构造：if-else，while，for
  - 转移的范围通常很小（<50指令）
  - 函数调用和无条件跳转用J型指令
- Q：如何用immediate表示地址？
  - 由于指令存储在主存中，而主存单元可以由基地址+偏移的方式定位
  - B类指令的基地址就是PC（即当前这条B类指令的PC值）

PC相对寻址

- PC相对寻址：PC为基地址，**immediate**为偏移（二进制补码）
  - 基本计算方法：PC←PC+偏移
  - 关键是：偏移值如何得到
- 下一条指令的PC值的计算方法
  - 比较结果为假：`PC = PC + 4`
  - 比较结果为真：`PC = (PC+4) + (immediate*4)`
- Q1：为什么**immediate**乘以4？
  - 存储器是以字节为单位的
  - 指令都是32位长，且指令是字对齐，这意味着最低2位恒为0
  - **immediate**没有必要记录最低2位，乘以4后就得到了对应字节地址！
- Q2：为什么基地址是PC+4，而不是PC？
  - 这与硬件设计有关，后续内容讲解

immediate表示的转移范围是否足够大？

- immediate为16位符号数，其表示范围是正负$\pm 2^{15}$
- 由于转移范围为$\pm 2^{15}$字，意味着转移的指令数为$\pm 2^{15}$条
  - immediate省略了最低2位，即量纲为字
- 按照1行C代码对应10条指令，则可转移的C代码块大小为3000行！

B类指令示例1/2

- MIPS指令

```
1  Loop: beq   $9, $0, End
2        addu  $8, $8, $10
3        addiu $9, $9, -1
4        j     Loop
5        End:
```

从beq后面的那条指令（addu）计算

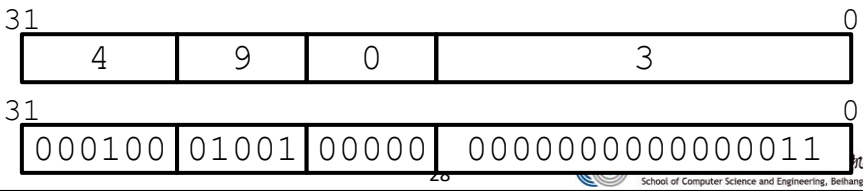
- 构造各域

opcode = 4 (查手册)

rs = 9 (1st寄存器)

rt = 0 (2nd寄存器)

immediate = 3



更深入的思考

- 如果移动代码，是否会导致B类指令的**immediate**域的变化？
  - 会变化：如果只移动某行，而不是移动B指令所涉及的整块代码
  - 无变化：如果移动B指令所涉及的整块代码
- 如果跳转的目的地址超出了2^{15}条指令，该怎么办？
  - 组合B类指令与J类指令

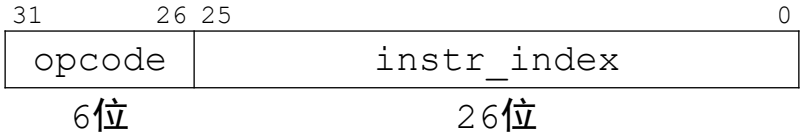
```
beq $s0,$0,far              bne $s0,$0,next
# next instr     -->        j   far
                        next: # next instr
```


提纲

- 存储型程序概念
- R-指令格式
- I-指令格式
  - 分支和PC相关寻址
- J-指令格式
- 汇编实战
- 反汇编实战

J型指令

- J指令只定义了2个域



- 要点
  - opcode的位置及位数与R型、I型指令保持一致
  - 其他域合并在一起来构造大的地址范围

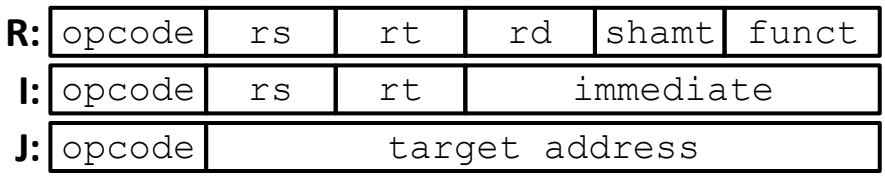
J型指令

$PC \leftarrow PC_{31..28} \,||\, instr\_index \,||\, 0^2$

- Q：J指令的转移范围有多大？
- 分析
  - PC的高4位来自当前指令的的高4位
  - PC的低28位用于寻址
  - 意味着目的地址与当前指令必在同一区段{X000_0000，XFFF_FFFF}
  - 故j指令的转移范围是256MB
- 由此可知，程序员无法用j指令跳转到256MB以外的地址空间（2^{28}）
- 只有jr可以跳转到4GB内任意地址
  - jr：R型指令

小节

- 现代计算机都是程序存储型的
  - 指令与数据一样存储在主存中
  - 读取指令与读取数据完全可以使用相同的硬件机制
  - 指令与数据位于不同区域
    - 通过PC读取的“32位01串”都被CPU当做指令
    - 通过Load/Store指令读写的“32位01串”都被CPU当做数据
- 3类指令格式



- B类指令使用PC相对寻址，J指令使用绝对地址寻址

提纲

- 存储型程序概念
- R-指令格式
- I-指令格式
  - 分支和PC相关寻址
- J-指令格式
- 汇编实战
- 反汇编实战

汇编

- 汇编是将汇编程序转换成二进制机器码的过程
- 每条指令的汇编基本步骤
  - S1：标识出指令类型（R/I/J）
  - S2：标识出正确的域
  - S3：用10进制表示各个域的值
  - S4：把各个域的10进制转换为2进制
  - S5：用16进制表示整个机器码

汇编实例

- 将下列汇编代码转换为相应的2进制机器码

```
地址   指令
800    Loop: sll $t1,$s3,2

804    addu  $t1,$t1,$s6

808    lw    $t0,0($t1)

812    beq   $t0,$s5, Exit

816    addiu $s3,$s3,1

820    j     Loop

       Exit:
```

汇编实例

- S1：标识出指令类型

地址　指令

```
800   Loop: sll $t1,$s3,2
```

R

```
804   addu  $t1,$t1,$s6
```

R

```
808   lw    $t0,0($t1)
```

I

```
812   beq   $t0,$s5, Exit
```

I

```
816   addiu $s3,$s3,1
```

I

```
820   j     Loop
```

J

```
      Exit:
```


汇编实例

- S2：标示出正确的域

地址　指令

```
800   Loop: sll $t1,$s3,2
```

R | opcode | rs | rt | rd | shamt | funct

```
804   addu  $t1,$t1,$s6
```

R | opcode | rs | rt | rd | shamt | funct

```
808   lw    $t0,0($t1)
```

I | opcode | rs | rt | immediate

```
812   beq   $t0,$s5, Exit
```

I | opcode | rs | rt | immediate

```
816   addiu $s3,$s3,1
```

I | opcode | rs | rt | immediate

```
820   j     Loop
```

J | opcode | target address

```
      Exit:
```

汇编实例

- S3：用10进制表示各个域的值

地址　指令

```
800  Loop: sll  $t1,$s3,2
```

R	0	0	19	9	2	0

```
804  addu  $t1,$t1,$s6
```

R	0	9	22	9	0	33

```
808  lw    $t0,0($t1)
```

I	35	9	8	0

```
812  beq   $t0,$s5, Exit
```

I	4	8	21	2

```
816  addiu $s3,$s3,1
```

I	8	19	19	1

```
820  j     Loop
```

J	2	200

```
     Exit:
```


汇编实例

- S4：把10进制转换为2进制

地址　指令

```
800  Loop: sll  $t1,$s3,2
```

R	000000	00000	10011	01001	00010	000000

```
804  addu  $t1,$t1,$s6
```

R	000000	01001	10110	01001	00000	100001

```
808  lw    $t0,0($t1)
```

I	100011	01001	01000	0000 0000 0000 0000

```
812  beq   $t0,$s5, Exit
```

I	000100	01000	10101	0000 0000 0000 0010

```
816  addiu $s3,$s3,1
```

I	001000	00000	10011	0000 0000 0000 0001

```
820  j     Loop
```

J	000010	00 0000 0000 0000 0000 1100 1000

```
     Exit:
```

汇编实例

- S5：转成16进制

```
    地址   指令
    800   Loop: sll $t1,$s3,2
R   0x 0013 4880
    804   addu  $t1,$t1,$s6
R   0x 0136 4821
    808   lw    $t0,0($t1)
I   0x 8D28 0000
    812   beq   $t0,$s5, Exit
I   0x 1115 0002
    816   addiu $s3,$s3,1
I   0x 2273 0001
    820   j     Loop
J   0x 0800 00C8
          Exit:
```


提纲

- 存储型程序概念
- R-指令格式
- I-指令格式
  - 分支和PC相关寻址
- J-指令格式
- 汇编实战
- 反汇编实战

反汇编

- 反汇编是汇编的逆过程，即将指令二进制代码转换为汇编代码的过程
- 反汇编基本步骤
  - S1：用2进制表示指令
  - S2：根据opcode标识出指令类型（R/I/J）
  - S3：用10进制表示各个域的值
  - S4：用标识符表示各域，并添加相应的标号
  - S5：用汇编格式书写代码
  - S6：将汇编代码翻译为C
    - 通常很难翻译为可读性C代码！需要创造性！

反汇编实例

- 把下来机器码翻译为汇编程序

地址	指令
0x00400000	0x00001025
0x00400004	0x0005402A
0x00400008	0x11000003
0x0040000C	0x00441020
0x00400010	0x20A5FFFF
0x00400014	0x08100001

反汇编实例

- S1：用2进制表示指令

地址	指令
0x00400000	00000000000000000001000000100101
0x00400004	00000000000001010100000000101010
0x00400008	00010001000000000000000000000011
0x0040000C	00000000010001000001000000100000
0x00400010	00100000101001011111111111111111
0x00400014	00001000000100000000000000000001

R:	opcode	rs	rt	rd	shamt	funct
I:	opcode	rs	rt	immediate		
J:	opcode	target address				

反汇编实例

- S2：根据opcode标示出指令类型

地址		指令
0x00400000	R	000000 00000 00000 00010 00000 100101
0x00400004	R	000000 00000 00101 01000 00000 101010
0x00400008	I	000100 01000 00000 0000000000000011
0x0040000C	R	000000 00010 00100 00010 00000 100000
0x00400010	I	001000 00101 00101 1111111111111111
0x00400014	J	000010 00000100000000000000000001

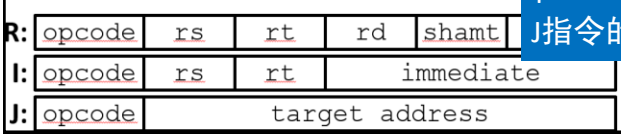
R:	opcode	rs	rt	rd	shamt	funct
I:	opcode	rs	rt	immediate		
J:	opcode	target address				

反汇编实例

- S3：用10进制表示各个域的值

地址		指令					
0x00400000	R	0	0	0	2	0	37
0x00400004	R	0	0	5	8	0	42
0x00400008	I	4	8	0	+3		
0x0040000C	R	0	2	4	2	0	32
0x00400010	I	8	5	5	-1		
0x00400014	J	2	0x0100001				

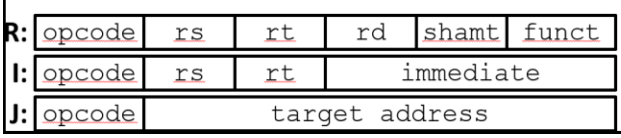
T
J指令的地址域保持为16进制



反汇编实例

- S4：用标识符表示各域

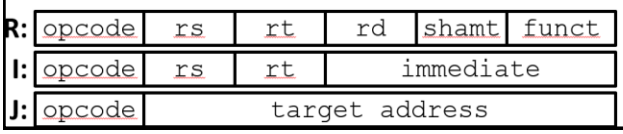
地址		指令					
0x00400000	R	0	$0	$0	$2	0	or
0x00400004	R	0	$0	$5	$8	0	slt
0x00400008	I	beq	$8	$0	+3		
0x0040000C	R	0	$2	$4	$2	0	add
0x00400010	I	addi	$5	$5	-1		
0x00400014	J	j	0x0100001				



反汇编实例

- S5-1：用汇编格式书写

地址	指令
0x00400000	or $v0,$0,$0
0x00400004	slt $t0,$0,$a1
0x00400008	beq $t0,$0,3
0x0040000C	add $v0,$v0,$a0
0x00400010	addi $a1,$a1,-1
0x00400014	j 0x0100001 # addr: 0x0400004



北京航空航天大学计算机学院
School of Computer Science and Engineering, Beihang University

反汇编实例

- S5-1：用汇编格式书写（用寄存器名有助于提高可读性）

地址	指令
0x00400000	or $v0,$0,$0
0x00400004	slt $t0,$0,$a1
0x00400008	beq $t0,$0,3
0x0040000C	add $v0,$v0,$a0
0x00400010	addi $a1,$a1,-1
0x00400014	j 0x0100001 # addr: 0x0400004

北京航空航天大学计算机学院
School of Computer Science and Engineering, Beihang University

反汇编实例

- S5-2：用汇编格式书写（添加标号）

```
地址              指令
0x00400000          or   $v0,$0,$0
0x00400004   Loop:  slt  $t0,$0,$a1
0x00400008          beq  $t0,$0,Exit
0x0040000C          add  $v0,$v0,$a0
0x00400010          addi $a1,$a1,-1
0x00400014          j    Loop
             Exit:
```


反汇编实例

- S5-2：用汇编格式书写（添加标号）

```
       or   $v0,$0,$0    # initialize $v0 to 0
Loop:  slt  $t0,$0,$a1   # $t0 = 0 if 0 >= $a1
       beq  $t0,$0,3     # exit if $a1 <= 0
       add  $v0,$v0,$a0  # $v0 += $a0
       addi $a1,$a1,-1   # decrement $a1
       j    Loop
```

反汇编实例

- S6：将汇编程序转换为C程序
  - 可以有很多种C代码对应到同一段汇编代码

```
/* a→$v0, b→$a0, c→$a1 */
a = 0;
while(c > 0) {
  a += b;
  c--;
}
```

- 代码分析：循环c次，每次累加b，即b被累加c次
- 代码功能：a = b x c